

Instituto de Geociências - USP
GSA 0419 – Geologia de Engenharia
Prof. Dr. Edilson Pissato
Caracterização Geológico-Geotécnica de Maciços Rochosos

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	2
2 – ROCHA INTACTA	4
2.1 Litologia	5
2.2 Alteração	6
2.3 Coerência.....	8
3 - DESCONTINUIDADES	9
3.1 – Grau de fraturamento	10
3.2 - Rock Quality Designation (RQD)	11
3.3 Persistência.....	15
3.4 Rugosidade	15
3.5 Abertura e preenchimento	17
3.6 Resistência	Erro! Indicador não definido.
4. PERMEABILIDADE	Erro! Indicador não definido.

1 - INTRODUÇÃO

Entende-se por maciço rochoso uma massa de rocha interrompida por descontinuidades, sob certas condições hidrogeológicas.

Descontinuidades são juntas, falhas, contatos litológicos, foliações metamórficas. Assim o maciço é composto por um agregado descontínuo de blocos, com formas geométricas irregulares, alternados com zonas de rocha intemperizadas em graus variáveis e com propriedades físicas muito diferentes, quando comparadas com a mesma massa de rocha intacta.

Os maciços rochosos são essencialmente heterogêneos, anisotrópicos e descontínuos. A definição de meio homogêneo ou heterogêneo, isotrópico ou anisotrópico, contínuo ou descontínuo é função da escala da porção do maciço analisada, em relação à obra considerada (IPT, 1984). A Figura 1 ilustra bem esta constatação.

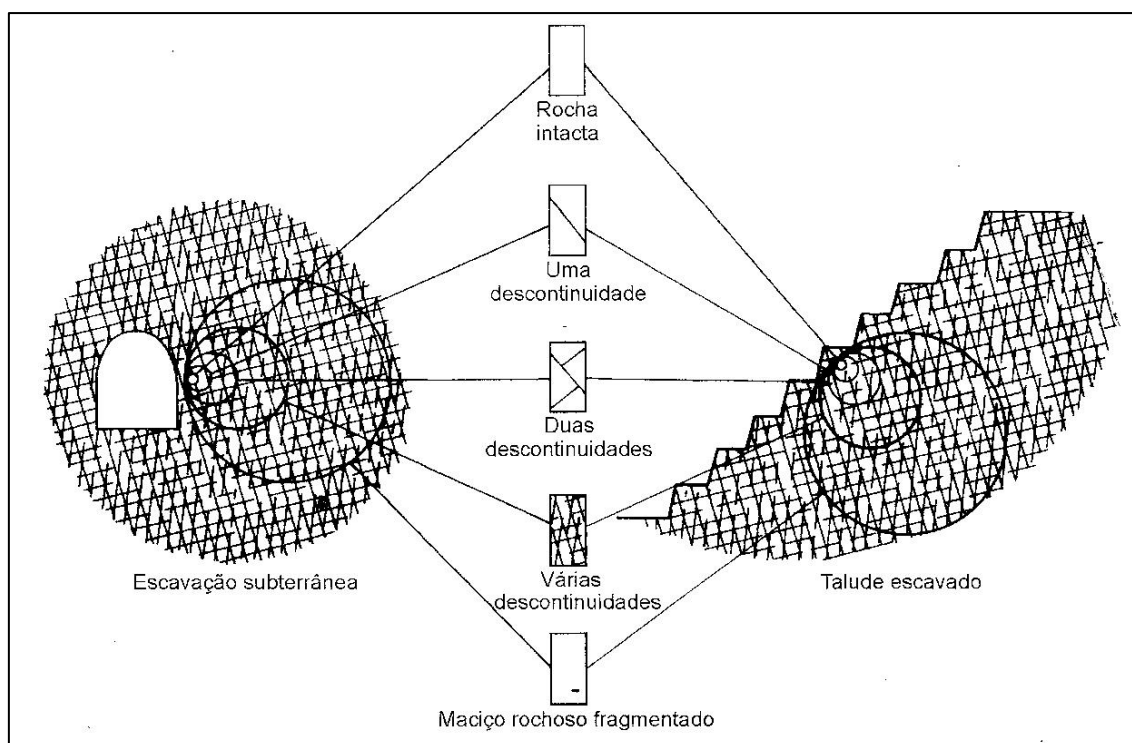


Figura 1 – Influência da escala na avaliação da compartimentação de um maciço rochoso (Extraída de Hoek, 1980).

A presença de descontinuidades no maciço rochoso é fator principal no controle de sua resistência mecânica e deformabilidade, de tal forma que a resistência de uma massa de rocha depende mais das descontinuidades

presentes do que propriamente da resistência das porções intactas da rocha (Fiori e Carmignani, 2009).

Na Figura 2(a) está representado um maciço com dois sistemas de descontinuidades e um corpo de prova retirado da rocha intacta. Na Figura 2(b) estão mostrados os comportamentos de ambos em uma curva tensão x deformação. Verifica-se que o maciço apresenta menor resistência que a rocha intacta, uma vez que as descontinuidades modificam as propriedades de resistência, geralmente reduzindo-as.

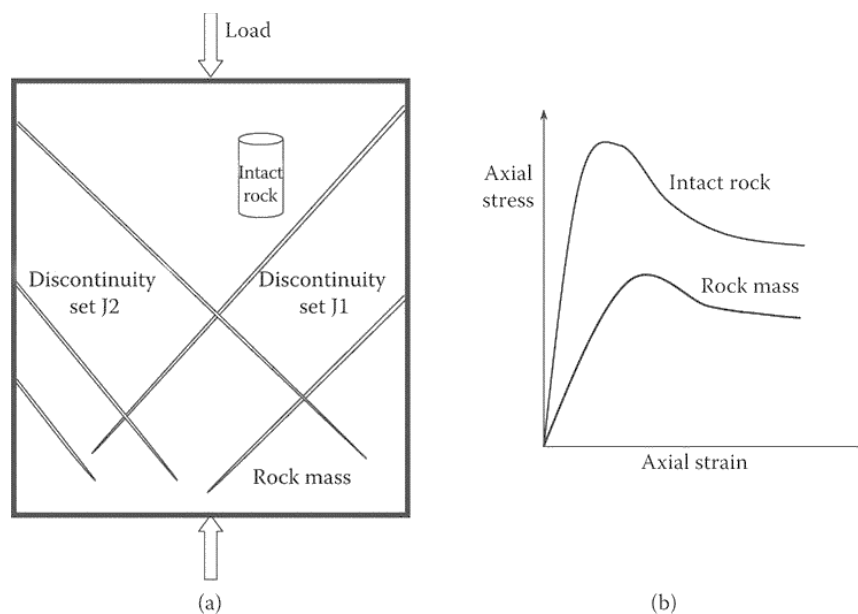


Figura 2. (a) Maciço rochoso e rocha intacta e (b) curva tensão x deformação dos dois materiais.

As características do maciço diferem de local para local, sendo necessário distinguir os atributos que condicionam o seu comportamento frente às solicitações impostas por determinada obra. Este procedimento é denominado caracterização geológico-geotécnica, ou geológico-geomecânica do maciço rochoso.

O ato de hierarquizar estas características, organizando-as individualmente em classes, às quais se possa associar comportamentos diferenciados do meio rochoso para as condições consideradas denomina-se **Classificação Geomecânica do maciço** (Junior Serra e Ojima, 1999), que será visto no próximo capítulo.

A caracterização constitui em identificar e qualificar ou quantificar os principais parâmetros que influenciam no comportamento geral do maciço rochoso. Tais parâmetros podem ser utilizados individualmente em análises ou avaliados em conjunto nos sistemas de classificação geomecânica.

A caracterização geológico-geotécnica dos maciços rochosos é feita com base na análise dos seus componentes: rocha intacta, descontinuidades e presença de água.

2 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA ROCHA INTACTA

No Quadro 01 estão representadas as principais características físicas dos materiais rochosos, divididas em propriedades de identificação e propriedades mecânicas.

A descrição geológica das rochas inclui o nome, mineralogia, textura, tipo de cimentação ou grau de alteração. A descrição petrográfica é realizada com base na observação macroscópica e análise microscópica, para determinação da mineralogia, textura, *fábric* (estrutura), grau de alteração, porosidade, microfraturamento etc. Para essa finalidade pode-se utilizar microscopia ótica ou eletrônica, ou técnicas de difração de raios-X.

Quadro 01. Propriedades da matriz rochosa e métodos para sua determinação.

	Propriedades	Métodos de determinação
Propriedades de identificação e classificação	Composição mineralógica Fábrica e textura Granulometria Cor	Descrição visual Microscopia ótica e eletrônica Difração de raios X
	Porosidade (η)	Ensaio de laboratório
	Peso específico (γ)	
	Umidade (μ)	
	Permeabilidade (k)	Ensaio de permeabilidade
	Durabilidade/Alterabilidade	Ensaio de alterabilidade
Propriedades mecânicas	Resistência à compressão simples (σ_c)	Ensaio de compressão uniaxial Ensaio de carga pontual Martelo de Schmidt
	Resistência à tração (σ_t)	Ensaio de tração
	Velocidades de ondas sísmicas	Ensaio de medida de velocidade em laboratório
	Resistência ao cisalhamento (c, ϕ)	Ensaio de compressão triaxial Ensaio de cisalhamento direto
	Deformabilidade (E, ν)	Ensaio de compressão uniaxial Ensaio de velocidade sônica

2.1 LITOLOGIA BÁSICA

A litologia corresponde ao tipo de rocha e às suas características intrínsecas de interesse para a obra considerada. Os diferentes tipos de rocha apresentam propriedades distintas, como resistência, abrasividades, permeabilidade, deformabilidade, durabilidade. Muitas propriedades físicas da matriz rochosa podem ser interpretadas em função das características petrográficas (porosidade, mineralogia, anisotropias, estruturas).

Conforme proposta da International Association of Engineering Geology (IAEG, 1981), a seguinte classificação é sugerida: tipo litológico, tipo geotécnico, suíte litológica e complexo litológico.

O tipo litológico apresenta homogeneidade em relação à composição, textura e estrutura, mas geralmente não é uniforme nas propriedades físicas.

O tipo geotécnico apresenta alta homogeneidade física. O tipo geotécnico está relacionado diretamente com variantes petrográficas dentro do tipo litológico. Exemplos são os tipos geotécnicos basalto maciço, vesicular ou amigdaloidal, variantes petrográficas do tipo litológico basalto, que apresentam características físicas muito distintas entre si (resistência, porosidade, densidade). Outro exemplo são as variantes de arenito friável (pouco resistente e muito permeável) e arenito silicificado (muitas vezes com resistência similar a uma rocha cristalina).

O complexo litológico compreende uma série de tipos litológicos geneticamente relacionados, desenvolvidos sobre condições geotectônicas e paleogeográficas específicas.

A suíte litológica compreende muitos complexos litológicos desenvolvidos sobre condições geotectônicas e paleogeográficas similares.

2.2 ALTERAÇÃO

As rochas podem sofrer alteração de origem física ou química. O intemperismo físico dá origem a modificações no tamanho e número de descontinuidades, o intemperismo químico decompõe quimicamente os minerais promovendo alterações químicas e mineralógicas.

Os maciços rochosos sujeitos ao intemperismo por longos períodos de tempo vão apresentar diferentes graus de alteração.

De uma maneira geral as rochas da crosta apresentam geralmente intemperizadas em algum grau, uma vez que sempre existirão fraturas a grandes profundidades nas quais ocorre infiltração de água provocando alguma alteração química nos minerais.

Nesta concepção todas as classificações descritivas da alteração de rochas definem vários graus de intemperismo. A seguir apresentamos algumas mais utilizadas no âmbito nacional e internacionalmente.

No Quadro 1 é apresentada a classificação geral do grau de intemperismo ou da alteração de material rochoso da Geological Society, extraído de Fiori e Carmignani (2009).

Quadro 1 – classificação de rochas intemperizadas segundo o Geological Society (Fiori e Carmignani, 2009).

Termo	Descrição	Grau
Rocha fresca	Sem evidências de material de alteração	IA
Muito pouco alterada	Descoloramento ao longo das maiores superfícies de descontinuidade	IB
Pouco alterada	Descoloramento indicando alteração da rocha e das descontinuidades. Todas as rochas apresentam-se descoloridas por ação do intemperismo e podem estar pouco enfrequcidas em relação ao estado fresco	II
Moderadamente alterada	Menos da metade da rocha apresenta-se decomposta, formando solo. Rocha fresca ou descolorida ocorre sob a forma de corpos relativamente contínuos ou em blocos.	III
Muito alterado	Mais de metade da rocha apresenta-se decomposta, formando solo. Rocha fresca ou descolorida ocorre sob a forma de corpos relativamente contínuos ou em blocos.	IV
Completamente alterada	Toda a rocha está decomposta. A estrutura da rocha original ainda está presente em grande parte.	V
Solo residual	Toda a rocha é convertida em solo. A estrutura e a textura da rocha original estão destruídas. Há grande mudança no volume, mas o solo não sofreu transporte significativo.	VI

No quadro 2 é apresentada a classificação com base nos graus de alteração proposta pelo IPT (1984). A letra W é referente à designação internacional, utilizada pela International Society of Rock Mechanics - ISRM.

Quadro 2 – Graus de alteração, segundo IPT (1984).

Sigla	Denominação	Características da rocha
A1/ W1/RS	Rocha sã ou praticamente sã.	Apresenta minerais primários de vestígios de alterações ou com alterações físicas e químicas incipientes. Neste caso a rocha é ligeiramente descolorida.
A2/ W2/ RAD	Rocha medianamente alterada (rocha alterada dura)	Apresenta minerais medianamente alterados e a rocha é bastante descolorida.
A3/ W3 /RAM	Rocha muito alterada (rocha alterada mole)	Apresenta minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis.

A4/ W4 /REA	Rocha extremamente alterada	Apresenta minerais totalmente alterados e a rocha é intensamente descolorida, gradando para cores de solo.
--------------------	-----------------------------	--

2.3 COERÊNCIA

A coerência é uma característica importante na caracterização do maciço e está diretamente ligada ao tipo e grau de alteração da rocha. É definida com base em propriedades de tenacidade, dureza e friabilidade das rochas e é determinada tátil-visualmente, através da apreciação da resistência que a rocha oferece ao impacto do martelo e ao risco com lâmina de aço.

A partir destes critérios classifica-se a rocha em coerente, medianamente coerente, pouco coerente ou incoerente. Da mesma forma que a alteração, trata-se de critério relativo, válido para comparação entre variedades de um mesmo litotipo (Serra Júnior e Ojima, 1999). O grau de coerência permite uma estimativa do valor da resistência à compressão simples, conforme Quadro 3.

Quadro 3 – Graus de coerência (ABGE, 1983).

Denominação	Descrição	Características	Resistência a compressão uniaxial (MPa) *	
C5	Extremament e branda	Marcada pela unha	R ₀	0,25 – 1,0
	Muito branda	Esmigalha-se sob o impacto da ponta do martelo de geólogo, pode ser raspada por canivete	R ₁	1,0 – 5,0
C4	Branda	Pode ser raspada por canivete com dificuldade, marcada por firme pancada com a ponta do martelo de geólogo	R ₂	5,0 – 25
C3	Medianamente resistente	Não pode ser raspada por canivete, amostras podem ser fraturadas com um único golpe do martelo de geólogo	R ₃	25 – 50
C2	Resistente	Amostras requerem mais de um golpe de martelo para fraturarem-se	R ₄	50 – 100
C1	Muito resistente	Amostras requerem muitos golpes de martelo para fraturarem-se	R ₅	100 – 250

Extremament e resistente	Amostras podem somente ser lascadas com o martelo de geólogo
-----------------------------	---

R₆

> 250

* Valores sugeridos por Hoek & Brown (1997).

2.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

3 - DESCONTINUIDADES

O estudo das descontinuidades é fundamental para determinação do comportamento dos maciços rochosos, principalmente em relação à deformabilidade, resistência e permeabilidade, podendo controlar toda a estabilidade do maciço rochoso.

São exemplos de descontinuidade as superfícies de foliação, acamamento, fraturas, juntas, etc.

Na Figura 3, são mostrados os componentes de um maciço rochoso e algumas das características das descontinuidades.

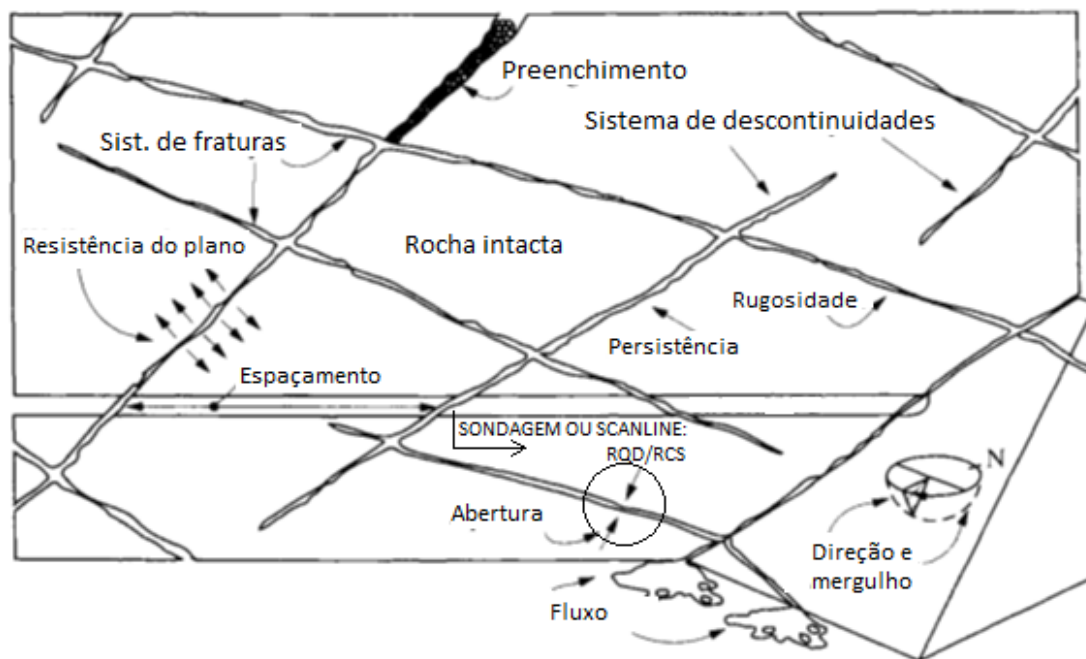


Figura 3. Constituintes de um maciço rochoso.

3.1 – GRAU DE FRATURAMENTO

Quanto ao estado de fraturamento de um maciço há vários critérios razoavelmente semelhantes entre si que caracterizam, em regra, o espaçamento entre diaclases. No Brasil, um dos mais utilizados é o proposto pelo IPT, representado no quadro 4, que define o fraturamento em relação ao número de fraturas por metro, ou seja, a sua frequência.

Quadro 4 – Graus de fraturamento (IPT, 1984).

Fraturas/m	Fraturas/m	Denominação
F₁	< 1	Ocasionalmente fraturado
F₂	1 a 5	Pouco fraturado
F₃	6 a 10	Medianamente fraturado
F₄	11 a 20	Muito fraturado
F₅	> 20	Extremamente fraturado

Outra forma de representar o fraturamento é pelo espaçamento médio entre as fraturas. No Quadro 5 é mostrada a proposta da ISRM.

Quadro 5 – Classificação de espaçamento médio das descontinuidades segundo a International Society of Rock Mechanics – ISRM (Fiori e Carmignani, 2009).

Termo	Espaçamento (mm)
Extremamente pequeno	<20
Muito pequeno	20 - 60
Pequeno	60 - 200
Moderado	200 - 600
Grande	600 - 2000
Muito grande	2000 - 6000
Extremamente grande	>6000

O grau de fraturamento, ou frequência, é determinada somando-se todas as descontinuidades interceptadas por uma linha e dividindo-se esse número pelo comprimento dessa linha.

Essa linha pode ser uma sondagem ou uma linha determinada para amostragem em um afloramento ou um túnel, por exemplo. Neste último caso, a linha é chamada *scanline*.

Sendo a frequência λ , tem-se:

$$\lambda = N/L \quad (1)$$

Onde N o número de descontinuidades interceptadas e L o comprimento em metros do trecho considerado (manobra ou *scanline*).

A relação entre o espaçamento médio (E) e a frequência é:

$$E = 1/\lambda \quad (2)$$

3.2 - ROCK QUALITY DESIGNATION (RQD)

Inicialmente proposto por Deere (1974) como um sistema de classificação de maciços, o RQD é hoje um parâmetro utilizados pelos principais sistemas de classificação geomecânica e pode ser obtido em amostras de sondagem rotativa, como inicialmente proposto, ou ainda em afloramentos ou túneis.

A obtenção a partir de sondagens rotativas é realizada conforme mostrado na Figura 4. Somam-se os comprimentos dos fragmentos maiores que 10 cm e divide-se o resultado pelo trecho total de perfuração (manobra). Multiplica-se então o resultado por 100, de forma a se obter o valor em percentagem.

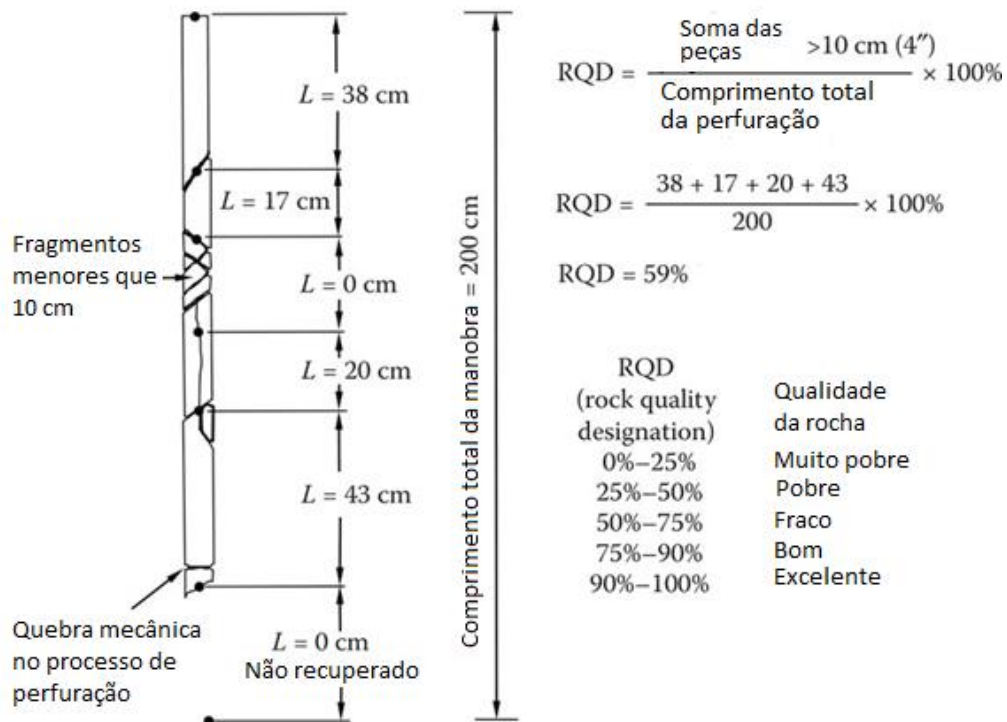


Figura 4. Obtenção do RQD em amostras de sondagem rotativa.

Para determinação do RQD em sondagens o ISRM (1981) recomenda que o diâmetro dos testemunhos seja NX (54,7 mm), retirado com amostradores de parede dupla usando broca de diamante. As fraturas mecânicas originadas pelo processo de perfuração devem ser desconsideradas.

Quando não há sondagens, o RQD pode ser obtido em campo, por meio do índice volumétrico de juntas J_v , utilizando a seguinte expressão, proposta por Palmström (1982):

$$RQD = 115 - 3,3J_v \quad (3)$$

O J_v é determinado obtendo-se os espaçamentos médios dos sistemas de descontinuidades observados, conforme mostrado na Figura 5.

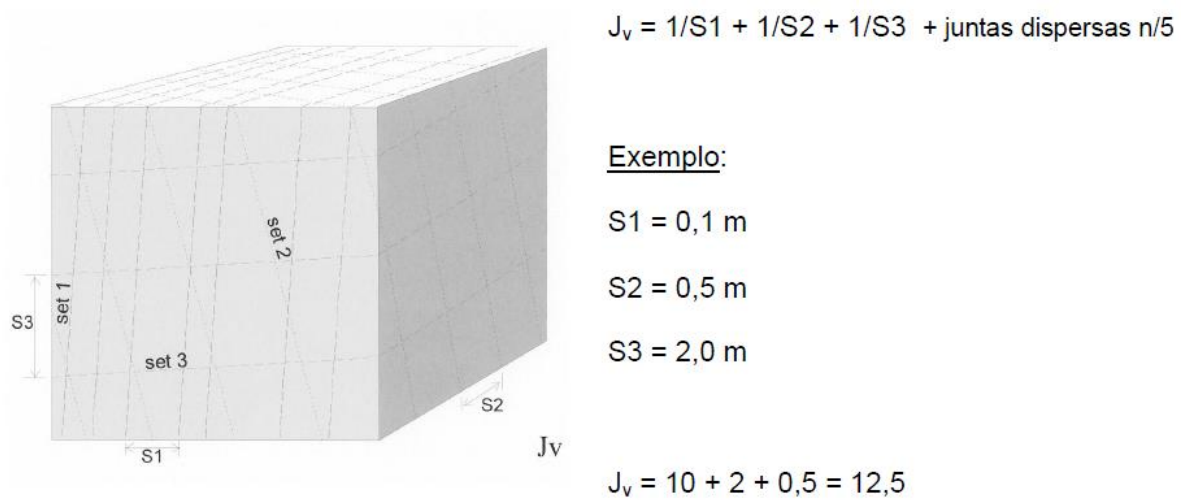


Figura 5 – Determinação do índice J_v . S1, S2 e S3 correspondem aos espaçamentos médios entre os respectivos sistemas e juntas.

Após novos dados, em 2005 Palmström propôs uma nova relação:

$$RQD = 110 - 2,5J_v \quad (4)$$

Em scanlines ou túneis o RQD é obtido conforme as relações obtidas do gráfico apresentado na Figura 6.

Nele se pode verificar que existem duas relações entre a frequência de fraturamento e o RQD. Para $\lambda > 16$, a relação é exponencial e definida pela equação:

$$RQD = 100e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda + 1) \quad (6)$$

Para $\lambda < 16$, a relação é linear, representada pela equação:

$$RQD = -3,68\lambda + 110,4 \quad (7)$$

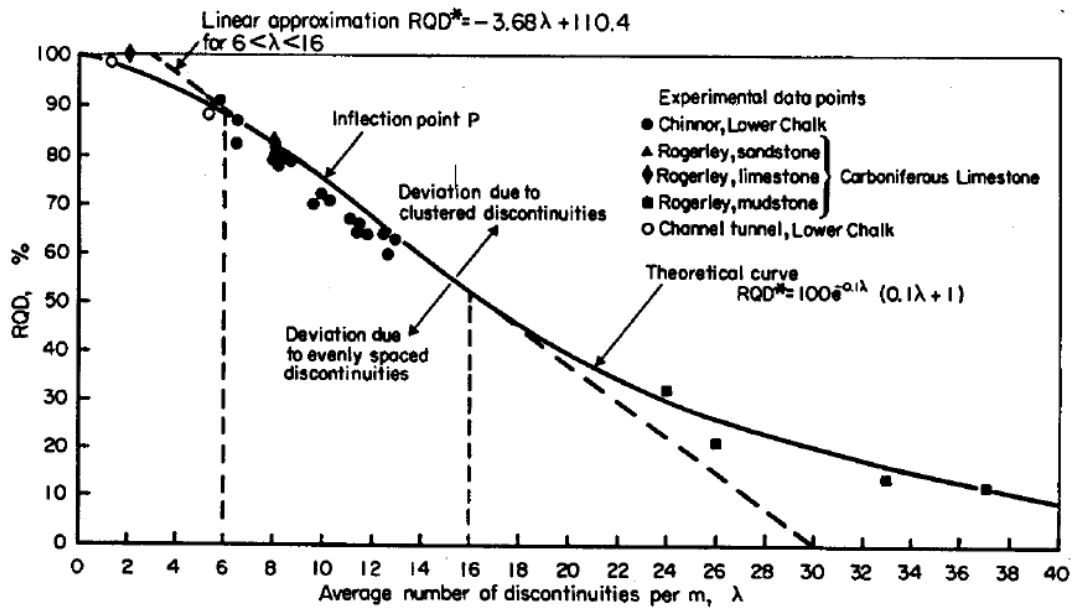


Figura 6. Relação entre RQD e frequência de descontinuidades (Priest & Hudson, 1976).

A frequência é obtida por meio da fórmula nº 1, obtendo-se inicialmente o espaçamento médio entre as descontinuidades interceptadas pela scanline.

No caso de descontinuidades inclinadas em relação à Scanline, o espaçamento medido é diferente do real. Neste caso, a medida deve ser corrigida, conforme mostrado na Figura 7.

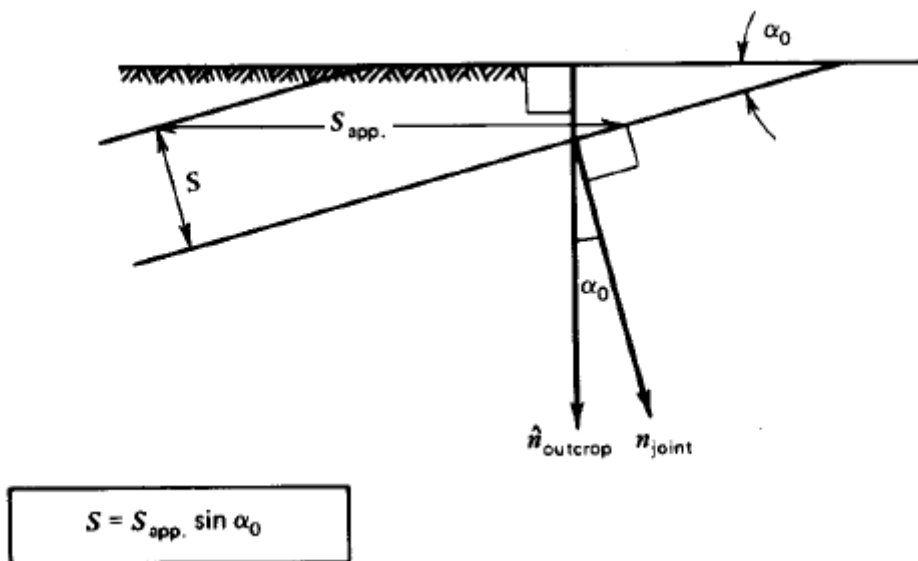


Figura 7. Relação entre o espaçamento aparente e o real.

3.3 PERSISTÊNCIA

3.4 RUGOSIDADE

A rugosidade das paredes das descontinuidades constitui uma propriedade importante, pois é responsável por uma parcela do atrito entre elas, parâmetro de grande importância na resistência ao cisalhamento,

A rugosidade pode ser obtida descritivamente conforme a Figura 8, ou por meio de atribuição de um valor, designado JRC, conforme a Figura 9.

Barton (1973) sugeriu um método para estimar a resistência ao cisalhamento (τ) de uma junta baseado no coeficiente de rugosidade (JRC). Ele foi expresso em termos da relação empírica, a seguir:

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan \left[JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] + \phi_r$$

Nessa equação, ϕ_r corresponde ao o ângulo de atrito residual, e σ_n é a tensão normal atuando na junta. JCS é a resistência à compressão simples das paredes, que pode ser obtido com o Martelo de Schmidt.

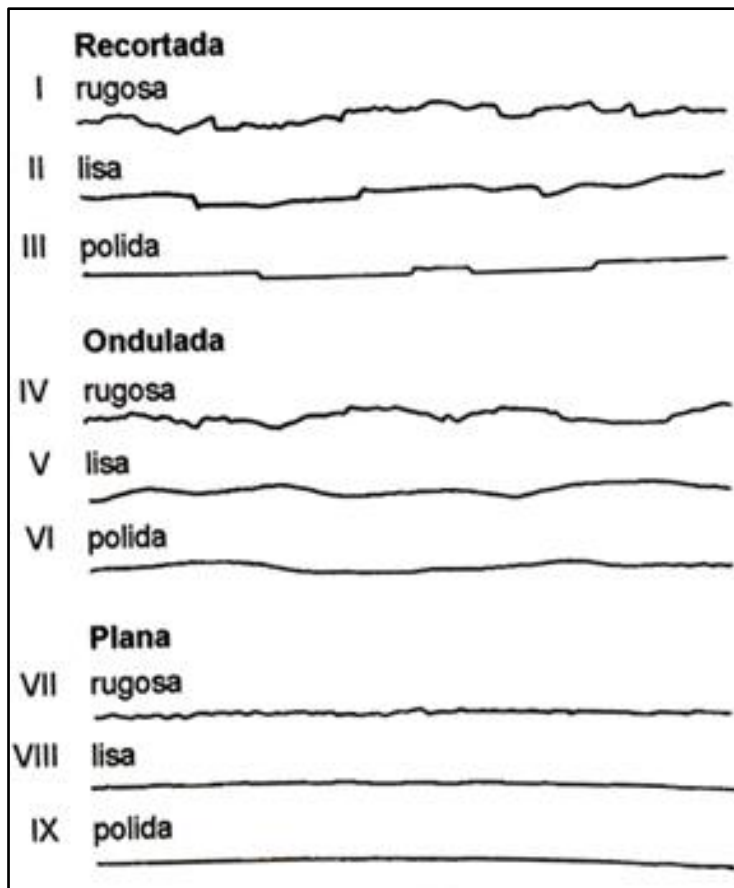


Figura 8. Perfis de rugosidade segundo ISRM (1981).

	JRC = 0-2
	JRC = 2-4
	JRC = 4-6
	JRC = 6-8
	JRC = 8-10
	JRC = 10-12
	JRC = 12-14
	JRC = 14-16
	JRC = 16-18
	JRC = 18-20

Figura 9. Joint Roughness Coefficient (JRC), Segundo Barton & Choubey (1997).

3.5 ABERTURA E PREENCHIMENTO

A abertura consiste na distância média entre as paredes da descontinuidade. Estas ainda podem estar preenchidas ou não. O tipo de material de preenchimento interfere nas propriedades da descontinuidade. Estes dois atributos podem ser difíceis de se identificar em sondagens comuns, pois o material de preenchimento normalmente é lavado no processo de perfuração, que utiliza água de circulação.

Nesses casos, a utilização de sondagens televisionadas tem sido bem aplicada. Estes permitem ainda a determinação da direção e mergulho das descontinuidades, o que se apresenta bastante difícil em testemunhos de sondagem rotativa.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE. (1983). Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos. São Paulo (tradução 12).

Barton, N.; Choubey, V. (1997). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, vol. 10, nº 1, pp. 1-54.

Fiori, Alberto Pio; Carmignani, Luigi. (2009). Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações da estabilidade de taludes. Ed. UFPR. Curitiba – 2ª Ed. 604 p.

Hoek, E. e Brown, E. T. (1980). *Underground excavation in rock*. London: IMM.

Serra Junior, E.; Ojima, L. M. 1998. Caracterização e classificação de maciços rochosos. *Geologia de Engenharia*/editores Antonio Manoel dos Santos Oliveira, Sérgio Nertan Alves de Brito – São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE.

Hoek, E; Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Elsevier, vol. 34, nº 8, pp. 1165–186.

International Society of Rock Mechanics – ISRM. (1981). *Rock characterization. Testing and monitoring. ISRM Suggested Methods*. Ed. Brown, E. T. Commission on testing and monitoring. Pergamon Press.

Palmström, A. (1995). RMi – a rock characterization system for rock engineering purposes. PhD Thesis, Oslo University, Norway.

Priest, S. D.; Hudson, J. A. (1976). Discontinuity spacings in rock. *Journal rock mechanics, mining eand geomechanics*, vol. 13, 00 135-148. Pergamon Press. Great Britain.